ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2001. Т 7. № 5/6. С. 75—79

УДК.528.8.04

А. Д. Федоровский[1], Л. Ф. Даргейко[2], В. П. Зубко[3], В. Г. Якимчук[1]

[1]Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

[2]Інститут кібернетики НАН України, Київ

[3]Національне космічне агентство України, Київ

Системный подход к оценке эффективности аппаратурных комплексов дистанционного зондирования Земли

Надійшла до редакції 23.01.01

Розглядаються методичні питания оцінки ефективності апаратурних комплексів ДЗЗ космічних апаратів у вирішенні задач науково-прикладних програм дистанційних досліджень земної поверхні на основі системного підходу.

Состав аппаратурных комплексов космических аппаратов, предназначенных для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), непосредственно связан с программами космических исследований земной поверхности. Очевидно, что при этом важно оценить, с одной стороны — какова вероятность решения поставленых задач с данным составом аппаратуры, а с другой — какими параметрами должны обладать приборы ДЗЗ для гарантированного решения конкретных научно-прикладных задач и всей программы в целом. Так как последнюю можно рассматривать как сложную систему, исследуем возможность оценки эффективности аппаратурного комплекса ДЗЗ космических аппаратов с позиций системного подхода.

Общеметодические положения системного подхода применимы для анализа большинства сложных систем, однако их реализация в каждом конкретном случае имеет свою специфику и требует формирования своих критериев и создания соответствующей процедуры принятия решения.

Системный подход как особая форма анализа предполагает не только получение информации об объекте исследований, но и сами исследования, направленные на получение целостных представлений об объекте из множества разрозненных односторонних представлений. Таким образом, системный подход заключается в соединении информации о методах исследования и о самом объекте. Методология системного подхода включает декомпозицию, оптимизацию и синтез с коррекцией в процессе его осуществления. Декомпозиция, основанная на многоуровневой структуризации, заключается в разбиении крупномасштабной и сложной системы на «независимые» подсистемы с их последующим моделированием. Декомпозиция может проводиться по разным признакам и отражать различные аспекты. Общее решение достигается путем движения от подсистемы более низкого к подсистемам более высокого уровня: состояние подсистем предыдущего уровня входит в качестве исходной информации в подсистему следующего уровня. Декомпозиция позволяет проводить независимую оптимизацию отдельных подсистем. Оптимальное решение на моделях более высокого уровня достигается в результате координирования методами многоцелевой оптимизации решений, получаемых на моделях предыдущего уровня [5].

Системный подход показывает недостаточность, а часто и вредность чисто локальных решений, полученных на основе охвата небольшого числа существенных факторов. Практически системный подход — это системный охват, системные представления, системная организация исследований. Рассмотрение проблемы с различных сторон часто выражается в участии специалистов различных специальностей и профилей. Системный подход приводит к необходимости рассмотрения многокритериальных задач, т. е. задач, в которых требуется одновременное достижение наилучших значений для всех критериев, каждый из которых характеризует одну из сторон рассматриваемой проблемы. В ряде случаев выбирается компромиссный вариант исследуемой системы. При этом процесс «отбора» является итерационным с использованием единого обобщенного критерия. Наиболее важными вопросами, составляющими сущность системного подхода, являются [1]:

— введение единого обобщенного критерия, сформулированного для всей системы в целом по множеству системных показателей (частных критериев);

— разработка метода отсева неперспективных и целенаправленного выбора компромиссного варианта системы из большого числа возможных вариантов.

В нашем случае системный подход означает использование на формальном уровне такого понятия, как классификация из теории распознавания образов и метода многокритериальной оптимизации, которые возникли и развивались благодаря системному взгляду на проблему.

Если программу исследований рассматривать как сложную систему, то подпрограммы, тематические задачи, их характеристики (информативные признаки) с одной стороны и аппаратурные комплексы, составляющие их приборы и параметры приборов с другой, можно считать подсистемами, находящимися на разных иерархических уровнях этой сложной системы [6]. В качестве обобщенного критерия будем использовать «функцию принадлежности», определяющую вероятность выполнения конкретных задач, подпрограмм и программы исследований в целом каждым составом аппаратуры. При этом множеством частных критериев будут являться «функции соответствия» — оценки соответствия параметров измерительной аппаратуры характеристикам тематических задач.

Пусть $M = (M_1, M_2, ..., M_i, ..., M_q)$ — научная программа, состоящая из множества подпрограмм M_i, каждая из которых содержит набор разных задач. $M_i = \{A_{i1}, A_{i2}, ..., A_{il}, ..., A_{ik_i}\}$ — множество задач i-й подпрограммы, где k_i — количество задач i-й подпрограммы. Для решения задач необходимо измерять их характеристики (информационные признаки). Для обозначения характеристик задач примем нумерацию по всем подпрограммам и задачам от 1 до m. Тогда $a = \{a_1, a_2, ..., a_j, ..., a_m\}$ — множество характеристик, измерение которых необходимо для решения всех задач программы. Для решения l-й задачи i-й подпрограммы необходимо измерять m_{il} характеристик ($m_{il} \le m$), которые обозначим как множество $a_{il} = \{a_{il1}, a_{il2}, ..., a_{ilj}, ..., a_{ilm(il)}\}$, $a_{il} \in a$. Для множества аппаратурных комплексов введем обозначение $B = (B_1, B_2, ..., B_c, ..., B_r)$, где B_c — c-й аппаратурный комплекс. Для параметров приборов введем нумерацию, соответствующую нумерации характеристик задач от 1 до n, множество которых запишется как $b = \{b_1, b_2, ..., b_j, ..., b_n\}$. Тогда комплекс аппаратуры B_c характеризуется n_c параметрами, множество которых имеет вид $b_c = \{b_{c1}, b_{c2}, ..., b_{cj}, ..., b_{cn(c)}\}$, $b_{cj} \in b$.

Необходимо оценить эффективность различных аппаратурных комплексов для решения всех задач программы исследований и выбрать из всего множества B наилучший вариант аппаратурного комплекса при условии

$$b^* = a \cap b \neq \varnothing. \quad (1)$$

Условие (1) говорит о том, что во множестве параметров имеющейся аппаратуры обязательно есть параметры b^*, которые необходимы для решения задач программы и наоборот. При этом возможны такие случаи:

1. $b^* = a$, $a \neq b$ — указанное пересечение совпадает со множеством a. Это соответствует тому, что измерение всех характеристик, необходимых для выполнения программы, возможно с помощью всего множества аппаратуры B;

2. $b^* = b$, $a \neq b$ — пересечение совпадает со множеством b. Это соответствует тому, что используются все параметры всего аппаратурного комплекса, но для выполнения программы этого недостаточно, т. е. необходимо измерение характеристик, для которых нет в аппаратурном комплексе соответствующих параметров.

3. $b^* = a = b$ — множества a и b совпадают; это означает, что параметры аппаратурного комплекса соответствуют характеристикам задач.

Для формализации и решения данной проблемы предлагается использовать методологию, применяемую в задачах классификации дискретных объектов [2]. Под классом понимается множество явлений, объединенных некоторыми общими свойствами. Распознаваемый объект наделен некоторым набором свойств. Задача определения класса объекта на лингвистическом уровне абстракции может быть сформулирована так: определить, какому из рассматриваемых классов принадлежит классифицируемый объект в наибольшей степени.

Необходимо установить, насколько сходен объект распознавания, в нашем случае это аппаратурный комплекс на космическом аппарате, с другими объектами (классами), которые представлены отдельными задачами и целыми научными подпрограммами, т. е. будем решать задачу классификации объекта B_c на множестве классов M_i $\in i \in 1,\ q$ и A_{il}, $\notin i \in 1,\ q$; $\in l \in 1,\ k_i$; $\notin c \in 1,\ r$, (на множестве всех подпрограмм и всех задач каждой подпрограммы).

Для решения таких задач используются алгоритмы, основанные на вычислении оценок, состоящие из следующих этапов: введение функции близости (невязки) сравниваемых величин, вычисление оценки для функции близости — функции соответствия, вычисление оценок для класса по множеству характеристик, вычисление оценок для класса по опорному множеству [1].

Функция соответствия описывает степень совпадения значений сравниваемых величин. Выбор той или иной функции соответствия определяется характером задачи. Вычисление оценок для класса означает учет степени важности, представительности признаков для характеристики класса. Вычисление оценок по опорному множеству означает определение близости между всеми подклассами одного класса и классифицируемым объектом. Решающее правило выносит суждение о принадлежности объекта к классу.

В нашем случае описанный выше подход включает вычисление следующих функций:

— близости (невязки) S, характеризующей близость отдельных значений характеристик задач и соответствующих значений параметров аппаратурного комплекса;

— соответствия f, которая показывает степень соответствия значений характеристик задач и соответствующих значений параметров аппаратурного комплекса;

— принадлежности F_1, которая показывает эффективность использования каждого аппаратурного комплекса для решения каждой тематической задачи;

— принадлежности F_2, которая показывает эффективность использования каждого аппаратурного комплекса для решения множества тематических задач каждой подпрограммы;

— принадлежности F_3, которая показывает эффективность использования каждого аппаратурного комплекса для решения всех тематических задач программы.

Решающее правило должно установить пороговые значения оценок, по которым можно из множества измерительных аппаратурных комплексов выбрать такой, который позволяет с наибольшей вероятностью решить тематические задачи и выполнить научно-прикладную программу.

Для этого определим близость для j-го параметра c-го аппаратурного комплекса ($c \in 1,\ r$) к j-й характеристике l-й задачи i-й подпрограммы с помощью функции близости в соответствии с выражениями (2)—(5):

— для параметров, значения которых максимизируются, т. е. чем больше значение параметра, тем больше вероятность решения задачи

$$s(a_{ilj},\ b_{cj}) = \begin{cases} (a_{ilj} - b_{cj})/a_{ilj} & a_{ilj} > b_{cj}\,, \\ 0 & a_{ilj} \le b_{cj}\,; \end{cases} \qquad (2)$$

— для параметров, значения которых минимизируются, т. е. чем меньше значение параметра, тем больше вероятность решения задачи

$$s(a_{ilj},\ b_{cj}) = \begin{cases} (b_{cj} - a_{ilj})/b_{cj} & a_{ilj} < b_{cj}\,, \\ 0 & a_{ilj} \ge b_{cj}\,; \end{cases} \qquad (3)$$

— для параметров, значения которых должны попадать в определенный диапазон между нижней a_{ilj} и верхней $\overline{a_{ilj}}$ границами

$$s(a_{ilj}\,,\ b_{cj}) = \begin{cases} (b_{cj} - \overline{a_{ilj}})/b_{cj}, & \overline{a_{ilj}} < b_{cj}\,, \\ 0, & \underline{a}_{ilj} \le b_{cj} \le \overline{a_{ilj}}, \\ (\underline{a}_{ilj} - b_{cj})/\underline{a}_{ilj} & \underline{a}_{ilj} > b_{cj}\,; \end{cases} \qquad (4)$$

— для характеристик, измерение которых не обеспечивается комплексом аппаратуры B_c

$$s(a_{ilj},\ b_{cj}) = 1. \qquad (5)$$

Оценку близости значений j-го параметра c-го аппаратурного комплекса и j-й характеристики l-й задачи i-й подпрограммы выполним с помощью функции соответствия

$$f(a_{ilj},\ b_{cj}) = [1 - S(a_{ilj},\ b_{cj})]K_1K_2\,, \qquad (6)$$

$$\in i \in 1,\, q, \qquad \notin l \in 1,\, k_i\,,$$

$$\in j \in 1,\, m_{il}\,, \qquad \notin c\ \in 1,\, r.$$

Здесь K_1, K_2 — коэффициенты пропускания атмосферы и наличия помех соответственно.

Поясним правомочность и целесообразность приведенного выбора. Функция близости S непрерывна и выпукла вниз по обеим аргументам, неотрицательна для любых значений аргументов, равна нулю при совпадении значений аргументов и когда значения параметров аппаратуры лучше требуемых характеристик задач. Если в комплексе B_c нет параметра, необходимого для решения задачи A_{il}, то невязка S принимает максимальное значение равное единице.

Функция соответствия f имеет тем большее значение, чем меньше невязка, т. е. чем меньше разница между значением измеряемой характеристикой задачи и значением параметра аппаратуры. Аппаратурный комплекс обеспечивает в наибольшей степени решение задачи, для которой функции соответствия всех параметров аппаратуры и характеристик задач максимальны. Чтобы оценить эффективность c-го аппаратурного комплекса при решении каждой задачи, определим функцию принадлежности $F_1(A_{il}, B_c)$ в виде

$$F_1(A_{il}, B_c) = \sum_{j=1}^{m_{il}} \rho(a_{ilj}, A_{il}) f(a_{ilj}, b_{cj}), \qquad (7)$$

$$\in i \in 1, q; \quad \notin l \in 1, k_i; \quad \in c \in 1, r.$$

Здесь ρ_{ilj} — весовой коэффициент важности характеристики j для l-й задачи i-й подпрограммы, индекс i определяет научную подпрограмму $i \in 1, q$, l — задачу $i \in 1, k_l$, c — аппаратурный комплекс $c \in 1, r$.

$$\sum_{j=1}^{m_{il}} \rho(a_{ilj}, A_{il}) = 1, \quad \in j \in 1, m_{il}.$$

Возможность выполнения научной подпрограммы можно оценить с помощью функции принадлежности следующего вида:

$$F_2(M_i, B_c) = \sum_{l=1}^{k_i} \rho(A_{il}, M_i) F(A_{il}, B_c) \qquad (8)$$

$$\in i \in 1, q; \quad \notin c \in 1, r,$$

где $\rho(A_{il}, M_i)$ — весовой коэффициент важности задачи A_{il} для подпрограммы M_i, для него тоже должно выполняться соотношение

$$\sum_{l=1}^{k_{il}} \rho(A_{il}, M_i) = 1, \quad \in l \in 1, k_{il}.$$

Возможность выполнения научной программы в целом можно оценить с помощью функции принадлежности следующего вида:

$$F_3(M, B_c) = \sum_{i=1}^{q} \rho(M_i, M) F_2(M_i, B_c), \qquad (9)$$

$$\in c \in 1, r; \quad \sum_{i=1}^{q} \rho(M_i, M) = 1, \quad \notin i \in 1, q.$$

В качестве порогового значения функций принадлежностей (7) можно взять нуль. Если функция принадлежности положительна, будем считать, что задача A_{il} может быть решена с помощью имеющейся аппаратуры, и чем больше ее значение, тем выше качество решения. Наибольшего значения, равного m_{il}, функция принадлежности (7) достигает при совпадении значений всех параметров аппаратуры и характеристик задач. Это указывает на возможность решения l-й задачи с помощью данного состава аппаратуры и можно считать, что вероятность решения задачи равна единице. Таким образом, отношение

$$p_{il}^{c} = \frac{F_1(A_{il}, B_c)}{m_{il}} = \frac{\sum_{j=1}^{m_{il}} \rho(a_{ilj}, A_{il}) f(a_{ilj}, b_{cj})}{m_{il}}, \qquad (10)$$

$$\in i \in 1, q; \quad \notin l \in 1, k_i; \quad \in c \in 1, r$$

определяет вероятность решения l-й задачи i-й подпрограммы с помощью c-го комплекса аппаратуры.

Выполнив вычисления P_{il} (10) для всех задач и аппаратурных комплексов, можно определить оптимальный аппаратурный комплекс для наиболее эффективного решения всего множества задач программы. Эта процедура может быть формализована как задача многокритериальной максимизации $\sum_{i=1}^{q} k_j$ критериев вида (10), каждый из которых является вероятностью решения l-й задачи i-й подпрограммы с помощью c-го аппаратурного комплекса.

Основной проблемой многокритериальной оптимизации является определение понятия компромиссного решения, так как чаще всего не существует решения, доставляющего оптимум одновременно по всем критериям [4]. Поэтому предлагаются разнообразные «свертки» критериев, т.е. введение обобщенного критерия, который сводит многокритериальную задачу к обычной задаче оптимизации. Выбор таких «сверток» сопровождается рассуждениями «нематематического» характера. Требование к таким функциям состоит в том, что они должны обеспечивать эффективное решение. Решение называется эффективным, если нет других решений, лучших хотя бы по одному критерию и не худшим по остальным, т. е. эффективное решение — это неулучшаемое решение.

Как известно [1—3], многокритериальные задачи сводятся к задачам обычной оптимизации с помощью линейной, минимаксной или максиминной свертки. Минимаксная решающая функция — это когда максимально возможное значение среднего риска достигает минимума. Применяются в том случае, когда об априорном распределении ничего не известно, следовательно, нужно рассчитывать на наихудший случай. Максиминная функция стремится максимизировать минимальный выигрыш. В рассматриваемом случае оценивается вероятность решения каждой задачи каждым аппаратурным комплексом и выбирается тот комплекс, для которого минимальная вероятность решения задачи наибольшая. Тем самым обеспечивается гарантированное решение всех задач. Математическое представление этих принципов выражается функциями, оптимизация которых приводит к эффективным решениям в случае многокритериальных задач.

Таким образом, необходимо определить аппаратурный комплекс (с индексом c), для которого достигают максимально возможных значений величины

$$\sum_{i=1}^{q}\sum_{l=1}^{k_i}\mu_{il}p_{il}^{c} \quad \text{или} \quad \min_{l}\mu_{il}p_{il}^{c}\,. \tag{11}$$

Здесь μ_{il} — весовой коэффициент, выражающий абсолютную ценность l-й задачи i-й подпрограммы и удовлетворяющий условию

$$\sum_{i=1}^{q}\sum_{l=1}^{k_i}\mu_{il} = 1.$$

Таким образом, выражение (11) позволяет дать оценку эффективности измерительных аппаратурных комплексов ДЗЗ для решения тематических задач программы исследований.

Постановку этой задачи можно варьировать, например, находить наиболее подходящий комплекс аппаратуры B_c для выполнения конкретной научной подпрограммы, пусть i-й. Тогда решение (комплекс с индексом с*) должно доставлять максимум функции

$$\sum_{l=1}^{k_i}\eta_l p_{il}^{c} \quad \text{или} \quad \min_{l}\eta_l p_{il}^{c},$$

т. е.

$$c^* = \operatorname*{argmax}_{c\in 1,r}\sum_{l=1}^{k_i}\eta_l p_{il}^{c} \quad \text{или} \quad c^* = \operatorname*{argmax}_{c\in 1,r}\min_{l}\eta_l p_{il}^{c}.$$

При этом η_l — весовой коэффициент, характеризующий важность l-й задачи для выполнения i-й подпрограммы.

1. Волкович В. Л., Волошин А. Ф. и др. Методы и алгоритмы автоматизированного проектирования сложных систем управления. — Киев: Наук. думка, 1984.—216 с.
2. Гермейер Ю. Б. Образование целей с векторным критерием // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика.—1976.— № 4.—С. 25—28.
3. Карманов В. Г. Математическое программирование. — М.: Наука, 1980.—258 с.
4. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982.— 328 с.
5. Системный подход в геологии: Тез. докл. II Всесоюз. конф. — М., 1986.—749 с.
6. Федоровский А. Д. Системный подход при проектировании сложной оптической аппаратуры // Оптико-мех. промсть.—1980.—№ 3.—С. 36—38.

A SYSTEM APPROACH TO THE ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF HARDWARE COMPLEXES FOR REMOTE EARTH SOUNDING

A. D. Fedorovsky, L. F. Dargeyko, V. P. Zubko, V. G. Yakimchuk

We discuss some metodological problems arising in the estimation of the efficiency of hardware complexes for remote sounding of the Earth's surface on the basis of the system approach.